



①⑨ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 44 39 298 A 1**

⑥① Int. Cl.⁶:
G 01 S 7/481

②① Aktenzeichen: P 44 39 298.2
②② Anmeldetag: 7. 11. 94
②③ Offenlegungstag: 13. 6. 96

DE 44 39 298 A 1

⑦① Anmelder:
Schwarte, Rudolf, Prof. Dr.-Ing., 57250 Netphen, DE

⑦② Erfinder:
gleich Anmelder

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ 3D-Kamera nach Laufzeitverfahren

DE 44 39 298 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine 3D-Kamera nach dem Laufzeitverfahren entsprechend dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Derartige 3D-Meßgeräte gehen heute zumeist von eindimensionalen Entfernungsmessgeräten aus, die auf dem Prinzip basieren, daß bei bekannter Laufzeit eines Meßsignals durch ein Medium und gleichzeitig bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit des Meßsignals in diesem Medium sich die Entfernung als Produkt von Laufzeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit ergibt. Im vorliegenden Fall wird das Meßsignal von elektromagnetischen Wellen, vorzugsweise von Lichtwellen, gebildet. Breiten sich die Lichtwellen in einem homogenen Medium, z. B. Luft oder Wasser aus, so ist die Entfernungsbestimmung bei Kenntnis der Laufzeit ohne weiteres möglich, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lichtwellen in dem homogenen Medium berücksichtigt wird.

Um die 3D-Vermessung einer 3D-Szene zu erreichen, wird der Meßstrahl des 1D-Meßgerätes i. allg. durch einen Spiegelscanner auf einzelne Punkte der 3D-Szene gelenkt.

Dabei liegt eine wesentliche Problematik der Entfernungsmessung nach dem Laufzeitprinzip unter Verwendung von Lichtwellen in der extrem hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit von 300.000 km/s, die eine extrem hoch aufgelöste Messung der Laufzeit erforderlich macht. Zum Beispiel ist für eine Meßgenauigkeit im mm-Bereich eine Zeitauflösung von einigen 10^{-12} s erforderlich. Um eine derart hoch aufgelöste Zeitmessung zumindest annähernd zu erreichen, sind in der Vergangenheit verschiedene Verfahren vorgeschlagen worden. Diese Verfahren lassen sich im wesentlichen in zwei Entwicklungsrichtungen unterscheiden; einerseits das Phasenlaufzeitverfahren andererseits das Pulslaufzeitverfahren.

Mit Entfernungsmessgeräten, die nach dem Phasenlaufzeitverfahren arbeiten, werden heute die höchsten Meßgenauigkeiten erzielt. Beim Phasenlaufzeitverfahren wird die Amplitude der Lichtwelle mit einer Frequenz im Hochfrequenzbereich moduliert. Die Laufzeitbestimmung des Meßsignals erfolgt nun aus dem Phasenvergleich der Modulation der ausgesandten Lichtwelle mit der Modulation der einlaufenden Lichtwelle, d. h. aus der Phasenlaufzeit vom Aussenden bis zum Empfangen des Lichts. Dabei wird die Modulationsfrequenz so gewählt, daß die Modulationswellenlänge — also nicht die Lichtwellenlänge — in einem Bereich liegt, der zumindest größenordnungsmäßig dem Bereich der zu messenden Entfernung entspricht. Da bei Phasenlaufzeitmessungen grundsätzlich das Problem der Mehrdeutigkeit bzgl. 2π besteht, und dieser Meßbereich bzw. die Modulationsfrequenz bei vielen Anwendungen nicht genügend eingeschränkt werden können, werden zwei oder mehrere Modulationsfrequenzen nacheinander gewählt.

3D-Kameras, die nach diesem Prinzip der 1D-Laufzeitmessung und einem zusätzlichen 2D-Scanner arbeiten, sind sehr aufwendig und langsam. Derartige Geräte dienen dazu, räumliche Objekte geometrisch zu vermessen. Herkömmliche 2D-Kameras liefern uns nur ein zweidimensionales Bild, das eine Projektion des dreidimensionalen Bildes darstellt. Dringend benötigt werden heute 3D-Meßgeräte für die schnelle und berührungslose Vermessung von Formen, Gegenständen und Abmessungen in industriellen Fertigungsprozessen, für weitere Schritte zur Automatisierung und vor allem zur integrierten 100%-Qualitätsüberwachung sowie für Sicherheitsaufgaben, Raumüberwachung, Navigationsaufgaben und Roboterhandhabung. Es sind somit 3D-Objekte sehr unterschiedlicher Größe in Meßvolumina von etwa $(0,1 \text{ m})^3$ bis über $(10 \text{ m})^3$ schnell und präzise zu vermessen. Zusätzlich ist oft die Farbinformation erforderlich.

Die auf dem Markt erhältlichen 3D-Meßgeräte arbeiten

1. nach dem Puls- oder Phasenlaufzeitverfahren. Die Tiefeninformation wird über die Puls- bzw. Phasenlaufzeit des zum Meßobjekt gesendeten und von diesem reflektierten Licht gewonnen. Bisher existieren Geräte nach diesem Verfahren auf der Basis eines eindimensionalen Laufzeitsystems, das über einen zusätzlichem 2D-Spiegelscanner den gewünschten Raumwinkel abscannt. Der Preis eines solchen Gerätes, z. B. der Fa. Stiefelmeyer, Esslingen, beträgt ca. 230.0000 DM.

2. mittels Interferometrie, d. h. unter Ausnutzung der Interferenz von Lichtwellen. Dabei ist ein Mindestmaß an Kohärenz des interferierenden Lichts und eine gewisse Glätte der Oberfläche erforderlich. Für die aufgeführten Aufgaben kommen derartige Geräte trotz der absoluten Meßeigenschaften neuerer Mehrfrequenzinterferometerverfahren heute aufgrund der Komplexität und Empfindlichkeit des Aufbaus sowie der Kosten und der Speckleprobleme nicht allgemein in Frage.

3. nach dem Triangulationsprinzip, insbesondere bildgebende Triangulationsverfahren mittels strukturierter Beleuchtung. Derartige Geräte bieten heute die besten Leistungen bzgl. der o.a. Aufgabenstellungen. Die Tiefeninformationen werden aus der Geometrie der Anordnung des Empfängers, des optischen Basisabstandes zur Beleuchtungsquelle und der Lichtstruktur auf dem Objekt berechnet. Nachteile liegen jedoch in folgenden prinzipiellen Meßeigenschaften:

Für Absolutmessungen komplexer Objekte ist es notwendig, mehrere Lichtstrukturen nacheinander auszuwerten, wobei das Objekt in Ruhe sein muß. Der entsprechend Zeitaufwand liegt im Sekundenbereich.

Ferner führt das sog. Triangulationsdreieck zu optischen Abschattungen. Die Flexibilität ist durch die optische Basis stark eingegrenzt, da der sinnvolle Meßbereich in der Größenordnung der optischen Basis liegt.

Das Laufzeitverfahren bietet an sich die größte Flexibilität der drei möglichen Verfahren, da jeder zu vermessende, reflektierende Bildpunkt einer 3D-Szene direkt durch den gesendeten und reflektierten Lichtstrahl erreicht wird und die Laufzeit proportional dem Abstand von Sender und Empfänger ist.

Das Hauptproblem besteht bei Laufzeitverfahren darin, eine hochpräzise Referenzmessung zu realisieren, da die Zeitdrift elektronischer Komponenten i. a. im ns-Bereich liegt, während eine Entfernungsauflösung von 1 mm entsprechend der Lichtlaufzeit für Hin- und Rückweg $6,6 \cdot 10^{-12}$ Sekunden, d. h. 6,6 ps benötigt.

Dieses Problem wird auch nicht durch das Konzept einer 3D-Kamera gelöst, bei der die Laufzeit durch Modulation der Verstärkung eines Bildverstärkers mit dem Modulationssignal des Senders ermittelt wird. Diese Modulation des elektronischen Verstärkers ist mit Jitter- und Laufzeitdrifteffekten verbunden, die eine Millimeter- oder Submillimetergenauigkeit nicht erlauben.

Das Ziel der vorliegenden Erfindung besteht darin, eine 3D-Kamera der eingangs genannten Art zu schaffen, die die elektronische Zeitdrift der bekannten Geräte und Verfahren überwindet und damit wesentlich höhere Genauigkeiten erreicht, die außerdem kompakt aufgebaut werden kann, die Hunderttausende von Raumpunkten parallel in kürzerer Zeit, als bisher möglich, vermessen kann, die sowohl dreidimensionale Grauwertbilder als auch 3D-Farbwertbilder zu liefern vermag, die flexibel an das gewünschte Meßvolumen allein durch synchrone Einstellung der Sende- und Empfangsoptik, ebenso flexibel an die gewünschte Genauigkeit oder Schnelligkeit der 3D-Bildfolge angepaßt werden kann und die durch Verwendung möglichst weniger und gleichartiger Komponenten wirtschaftlich zu fertigen ist.

Zur Lösung dieser Aufgabe sieht die Erfindung vor, daß der Sender intensitätsmodulierte Lichtwellen mindestens eines Spektralbereichs, jedoch vorzugsweise von drei, den Farben rot, grün und blau entsprechenden Spektralbereichen aussendet und die von der 3D-Szene 13 in den Empfänger 23 reflektierten Lichtwellen vorzugsweise durch vorgeschaltete Bandfilter 17 spektral getrennt über mindestens einen Intensitätsmodulator 22 wahlweise von mindestens einem spektral zugehörigen 2D-Empfangelement 25, vorzugsweise einem Mehrfarben-CCD-Chip, pixelweise in elektrische Signale umgewandelt werden, aus denen mittels der Auswerteeinheit 26 dreidimensionale Grauwertbilder oder vorzugsweise dreidimensionale Farbbilder rekonstruiert werden und daß dabei die Lichtquelle 2 des Senders 9 zumindest zeitweilig Licht konstanter Intensität aussendet, das durch einen nachgeschalteten optischen Intensitätsmodulator 8 moduliert wird, wobei die empfangenen Lichtwellen durch den dem 2D-Empfangelement 25 vorgeschalteten optischen Intensitätsmodulator 22, der möglichst gleichartig zum sendeseitigen Intensitätsmodulator 8 ausgelegt und betrieben wird, demoduliert werden, und wobei beide Intensitätsmodulatoren 8 und 22 durch das gleiche Modulationssignal oder durch das bis auf einen durch ein steuerbares Verzögerungsglied 28 verursachten Zeitversatz gleiche Modulationssignal vorzugsweise wahlweise in Form einer Sinusschwingung im MHz bis GHz-Bereich oder in Form von Nadelimpulsen im ps- bis ns-Bereich angesteuert wird.

Der Hauptvorteil des vorgeschlagenen Verfahrens liegt erfindungsgemäß in der Eigenschaft, daß zur pixelweisen Laufzeitbestimmung keine elektronischen Drifterscheinungen auftreten, da sende- und empfangsseitig mit dem gleichen Modulationssignal und gleichartigen Intensitätsmodulatoren 8 und 22 nur optisch parallel moduliert und demoduliert wird wahlweise mit oder ohne gegenseitige Zeitverschiebung dieser beiden Modulationssignale durch die Verzögerungseinheit 28, die z. B. als reines Laufzeitglied realisiert werden kann und da die nachfolgende Signalverarbeitung der Pixelamplituden von diesem Echtzeitmeßvorgang prinzipiell entkoppelt ist.

Damit kann erstmals mit Hilfe des Laufzeitverfahrens eine Auflösung und Genauigkeit erreicht werden, die in die Größenordnung interferometrischer Verfahren gelangt.

Die Interferometrie beruht im Prinzip auch auf Laufzeiteffekten, nur mit dem Unterschied, daß Referenzen grundsätzlich optischer Art und auf eine gewisse Kohärenz angewiesen sind.

Hinzukommt erfindungsgemäß die Möglichkeit, für hochpräzise Absolutmessungen zwischen Sender und Empfänger eine optische Referenzstrecke einzufügen, die vorzugsweise aus mehreren abgestuften Lichtleitfasern besteht und systematisch bestimmten Pixeln des 2D-Empfangelements optisch zugeordnet ist und keine Zeitdriftfehler verursacht. Auf diese Weise wird eine Kalibrierung der 3D-Aufnahme in allen drei Dimensionen realisiert.

Ein weiterer entscheidender Vorteil ist die Schnelligkeit der 3D-Bildaufnahme.

Die heute käuflichen CCD-Elemente detektieren 50 bis 250 Bilder pro Sekunde. Da zur Berechnung eines 3D-Bildes drei bis fünf 2D-Intensitätsbilder erforderlich sind, können mehr als zehn 3D-Bilder pro Sekunde gewonnen werden. Das bedeutet, daß mehr als 10 vollständige 3D-Bilder mit Hunderttausenden von Raumpunkten bzw. Voxel inklusive der Grauwertinformation oder — bei dreifacher Anwendung des Verfahrens z. B. für rot, grün und blau in einer entsprechenden 3D-Farbkamera — 10 vollständige 3D-Farbbilder pro Sekunde ermittelt werden.

Ein großer Vorteil gegenüber bisherigen Konzepten ist die Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Abstände und Meßvolumina. Im gleichen Meßsystem kann durch synchrone Änderung der Sende- und Empfangsoptik z. B. durch ZOOM-Funktionen die 3D-Vermessung der Objektgröße angepaßt werden.

Der Mehraufwand des vorgeschlagenen Systems beträgt dabei weit weniger, als der dreifache Aufwand, bietet aber ein Vielfaches an Meßsicherheit und Information, da das gültige 3D-Farbbild durch die redundante Vereinigung der drei auf z. B. rot, grün und blau beruhenden 3D-Einzelfarbbilder rekonstruiert werden kann.

Fig. 1 zeigt ein vereinfachtes Blockschaltbild einer 3D-Farbkamera. Sie enthält vor allem

- einen optischen Sender 9, der eine 3D-Szene 13 mit z. B. drei Wellenlängen λ_1 , λ_2 und λ_3 beleuchtet,
- einen Modulationsgenerator 1, der gleichermaßen den Sender 9 als auch den Empfänger 23 moduliert,
- einen Empfänger 23, der das reflektierte Streulicht der 3D-Szene 13 empfängt,
- eine Auswerteeinheit 26, die z. B. die aus mindestens drei empfangenen Intensitätsbildern für verschiedene Modulationsfrequenzen des Modulationsgenerators 1 und für verschiedene Laufzeitunterschiede bei sinusförmigen oder impulsförmigen Modulationssignalen auswertet, sowie eine
- Ablaufsteuerung, die den gesamten Meßvorgang zeitlich steuert und erfindungsgemäß in der Lage ist, über die Verbindung 36 optimal bzw. in gewünschter Weise auf das Meßergebnis zu reagieren.

Erfindungsgemäß wird auf der Sendeseite mindestens eine Lichtquelle 2 mit vorzugsweise konstanter Intensi-

tät und einer relativen spektralen Halbwertsbreite von z. B. 5—10% verwendet.

In Fig. 1 ist eine Ausführung mit drei derartigen Einzellichtquellen 2a, 2b und 2c dargestellt, die erfindungsgemäß unterschiedliche Spektralbereiche mit den Mittenwellenlängen $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ z. B. für rot, grün und blau liefern.

Das Licht der wahlweise ein- oder mehrfachen Lichtquelle 2 wird durch mindestens einen zweidimensionalen optischen Sende-Intensitätsmodulator 9, dessen Transmission nach Maßgabe des vom Modulationsgenerator 1 gelieferten Modulationssignals in der Intensität moduliert und über eine geeignete, in Fig. 1 nicht dargestellte Optik, als intensitätsmodulierte, ein- oder mehrfarbige Lichtwelle in Form von Sinusschwingungen 12 oder Nadelimpulsen 11 auf die zu vermessende 3D-Szene 13 gesendet.

Der Empfänger 23 ist mit seiner Optik, in Fig. 1 ebenfalls nicht ausgeführt, auf den gleichen, vom Sender 9 beleuchteten Bereich der 3D-Szene 13 ausgerichtet und empfängt den Teil des in Richtung des Empfängers reflektierten Lichts. Diese reflektierten Lichtwellen 14 bzw. 15 enthalten die räumlichen Entfernungsinformationen der 3D-Szene im Fall der Sinusmodulation in den Phasenlaufzeiten und im Fall der Nadelimpulsmodulation in den Pulslaufzeiten. Zur driftfreien Ermittlung dieser Laufzeiten wird das empfangene Licht getrennt durch spektrale Bandfilter z. B. 17a, 17b und 17c entsprechend der Zahl der gesendeten Spektralbereiche entweder auf einen gemeinsamen oder den Spektralbereichen entsprechend zugeordneten Empfangs-Intensitätsmodulatoren z. B. 22a, 22b und 22c geführt, wobei dieser ein- oder mehrfache Empfangs-Intensitätsmodulator 22 erfindungsgemäß durch das gleiche bzw. durch das um eine Laufzeit τ zeitversetzte Modulationssignal wie der Sende-Intensitätsmodulator 8 moduliert wird.

Höchste Reichweiten bzw. Empfindlichkeiten werden mit der erfindungsgemäßen 3D-Kamera dadurch erreicht, daß die Ablaufsteuerung 27 in der strichlierten Stellung des Schalters 29 einerseits über die gesteuerte Phaseeinheit 28 eine binäre Phasenumtastung, daß heißt Phasenänderungen von 0° und 180° zusätzlich zu einer Grundphasenverschiebung für das Sende-Modulationssignal nach vorzugsweise einem pseudobinären Zufallscode bewirkt, während das Empfangs-Modulationssignal unbeeinflusst bleibt, und andererseits die Auswerteeinheit über die Verbindung 31 und/oder das Empfangselement 25 so steuert, daß die Intensitätsamplituden pixelweise entsprechend diesem Pseudozufallscode positiv bzw. negativ gewichtet und über mehrere Perioden dieses Codes aufintegriert werden.

Die vorgeschlagene 3D-Kamera bietet erstmals eine technisch realisierbare Möglichkeit, 3D-Farbbilder zu liefern. Bisher sind keine derartigen Geräte oder Verfahren bekannt geworden.

Durch die Multiplikation des mit dem sendeseitigen Modulationssignal intensitätsmodulierten und durch die 3D-Szene und wahlweise bei der strichlierten Stellung des Schalters 29 durch die Verzögerungseinheit verzögert empfangenen Lichts mit dem gleichen Modulationssignal im Empfangs-Intensitätsmodulator 22 entsteht eine mittlere Lichtintensität, die in einem festen Zusammenhang von der Laufzeit- bzw. Phasenbeziehung beider Signale am Ort des Empfangs-Intensitätsmodulators 22 abhängt.

Diese Mittelwertbildung dieser sendeseitig und empfangsseitig modulierten Lichtintensität erfolgt pixelweise durch Integration auf mindestens einem 2D-Empfangselement 25, das im Falle von z. B. drei Spektralbereichen des Sendelichts ein Dreifarben-CCD-Chip enthalten kann oder durch drei den Spektralbereichen zugeordneten 2D-Empfangselementen 25a, 25b und 25c realisiert wird.

Für sinusförmige Modulationssignale entsteht bei diesem pixelweise homodynem Mischverfahren am Ort des Empfangs-Intensitätsmodulators 22 eine Art Interferenzbild bzw. Interferogramm, das als Ladungsbild auf dem 2D-Empfangselement abgebildet und ausgelesen wird.

Durch mindestens drei verschiedene Messungen einer Pixelamplitude bei der gleichen 3D-Szene z. B. durch 3 verschiedene Frequenzen des Modulationsgenerators 1 oder durch drei verschiedene Phasenlaufzeiten bzw. Phasenwinkel durch die Verzögerungseinheit 28 kann bekanntlich die Pixelphase und damit der zugehörige gesuchte Entfernungswert ermittelt werden. Der Mittelwert bzw. Gleichanteil einer z. B. mit einem CCD-Pixel gemessenen Lichtintensität I_{CCD0} ergibt sich aus dem Intensitätsverlauf $I_{CCD}(t)$ wie folgt:

$$I_{CCD}(t) = K \cdot T(t)E(t) = K(T_0 + T_m \cdot \cos \omega t)(E_0 + E_m \cos(\omega t - \varphi))$$

$$I_{CCD}(t) = K(T_0 E_0 + T_0 E_m \cos(\omega t - \varphi) + E_0 T_m \cos \omega t + \frac{T_m E_m}{2} \cos \varphi + \frac{T_m E_m}{2} \cos(2\omega t - \varphi))$$

mit:

K = Konstante

ω = Modulationskreisfrequenz

φ = Phasenlaufzeit des Pixelsignals

$T(t)$ = Transmissionsfaktor des sinusförmig modulierten Intensitätsmodulators 8 bzw. 22 mit Mittelwert T_0 und Modulation T_m

$E(t)$ = Empfangsintensität des Pixels mit Mittelwert E_0 und Wechselanteil E_m

Der Mittelwert bzw. Gleichanteil I_{CCD0} hängt danach wie folgt von der Phase φ ab:

$$I_{CCD0} = K(T_0 E_0 + T_m E_m \cos \varphi).$$

Bezogen auf die gesamte xy-Ebene z. B. eines CCD-Chips ergibt sich — hier nicht durch Überlagerung sondern durch multiplikative Mischung — eine Art Interferogramm der üblichen Form:

$$I_{\text{CCD0}}(x,y) = I_0(x,y) + I_m(x,y)\cos\varphi.$$

Unbekannt in dieser Gleichung sind die drei Größen als Gleichanteil bzw. Grundhelligkeit, I_m als Wechselanteil bzw. Kontrast sowie $\varphi = 2\pi fT = \omega T$ als Phasendifferenz zwischen dem Modulationssignal und dem Empfangssignal. T ist die gesuchte Phasenlaufzeit. Durch 3 Messungen für verschiedene Frequenzen oder Phasen können alle drei Größen ermittelt werden, z. B. $f = f_1, f_2$ und f_3 :

$$I_{\text{CCD01}} = I_0 + I_m \cos 2\pi f_1 T, I_{\text{CCD02}} = I_0 + I_m \cos 2\pi f_2 T, I_{\text{CCD03}} = I_0 + I_m \cos 2\pi f_3 T$$

oder durch zusätzliche Phasenverschiebungen φ_z die gemäß Bild 1 durch den Schalter 29 in der strichlierten Stellung realisierbar sind:

$\varphi_z = 2\pi f\tau$; mit $\tau = \tau_1, \tau = \tau_2$ und $\tau = \tau_3$ ergeben sich wiederum drei Bestimmungsgleichungen

$$I_{\text{CCD01}} = I_0 + I_m \cos(2\pi fT + 2\pi f\tau_1),$$

$$I_{\text{CCD02}} = I_0 + I_m \cos(2\pi fT + 2\pi f\tau_2),$$

$$I_{\text{CCD03}} = I_0 + I_m \cos(2\pi fT + 2\pi f\tau_3).$$

Dieses letztere Verfahren ist in der Interferometrie und auch in der Triangulation mit strukturiertem Licht unter dem Namen "Phasenshiftverfahren" weit verbreitet und wird durch schnelle Algorithmen ausgewertet.

In der Praxis wird die Auswertung i. a. mit mehr als 3 Messungen durchgeführt, um durch überstimmte Gleichungssysteme die Meßgenauigkeit zu erhöhen.

Fig. 2 veranschaulicht eine vorteilhafte Ausführungsmöglichkeit der erfindungsgemäßen 3D-Kamera, hier für nur einen Spektralbereich ausgeführt.

Diese Darstellung entspricht weitgehend der von Fig. 1, jedoch wird hier eine Realisierungsmöglichkeit der sende- und empfangsseitigen optischen Intensitätsmodulatoren 8 und 22 dargestellt. Weiterhin wird in Fig. 2 eine mögliche Anordnung der Sendeoptik 3 und 10 und Empfangsoptik 16 und 24 vorgeschlagen.

Die beiden Intensitätsmodulatoren 8 und 22 dieses Ausführungsbeispiels sind vorzugsweise identisch aufgebaut und beruhen auf der polarisationsabhängigen Lichtdurchlässigkeit eines Polarisators bzw. Polarisationsfilters.

Ein Polarisationsfilter mit senkrechter Polarisation ist z. B. für senkrecht polarisiertes Licht völlig durchlässig und für horizontal polarisiertes Licht völlig sperrend. Die Transmission ist proportional dem Cosinusquadrat der Winkelabweichung.

In beiden Intensitätsmodulatoren 8 und 22 durchläuft das Licht vorzugsweise die gleichen optischen Komponenten.

Zunächst zur sendeseitigen Funktionsweise: Das Sendelicht der Lichtquelle 2 fällt nach der 1. Sendeoptik 3 auf ein 1. Polarisationsfilter 4, das z. B. horizontal polarisiert sein möge. D. h., nur das horizontal polarisierte Licht der Lichtquelle kann passieren. Anschließend trifft es auf den Sende-Polarisationsmodulator 5, der aus einem lichtdurchlässigen Material mit elektrooptischen Eigenschaften besteht. Danach trifft das Licht über eine später beschriebene, wahlweise einsetzbare $\lambda/4$ -Platte 6 auf ein 2. Polarisationsfilter, dessen Polarisationsrichtung zu der des 1. Polarisationsfilters 4 gekreuzt ist bzw. senkrecht steht.

Erfolgt zwischen diesen beiden gekreuzten Polarisationsfiltern keine zusätzliche Drehung der Polarisation, so ist diese Lichtstrecke völlig gesperrt.

Gleiches gilt für die entsprechend aufgebaute Empfangsstrecke. Dabei weist das eingangsseitige 3. Polarisationsfilter vorzugsweise die gleiche Polarisationsrichtung des Sendelichts auf. Das empfangene, z. B. senkrecht polarisierte Licht wird vom z. B. senkrecht polarisierten 3. Polarisationsfilter 18 vollständig durchgelassen. Anschließend trifft es analog zum Aufbau des Sende-Intensitätsmodulators 8 auf den Empfangs-Polarisationsmodulator 19, weiterhin wahlweise auf eine $\lambda/4$ -Platte und danach auf ein 4. Polarisationsfilter 21, das zum 3. Polarisationsfilter gekreuzt ist und somit ohne weiteres kein Licht durchläßt.

Die Lichtdurchlässigkeit bzw. Transmission kann durch Anlegen einer Spannung an den sende- und empfangsseitigen Polarisationsmodulator 5 bzw. 19 über das Modulationssignal des Modulationsgenerators 1 beeinflusst werden, indem hiermit die Polarisationsrichtung zwischen den gekreuzten Polarisatoren 4 und 7 des Senders bzw. des Empfängers 18 und 21 gedreht wird.

Die Funktionsweise dieser beiden Polarisationsmodulatoren beruht auf dem elektrooptischen Effekt. Der Brechungsindex bzw. das Brechungsindex-Ellipsoid bestimmter elektrooptisch aktiver Kristalle wie z. B. KDP, ADP, LiNbO₃ usw. und ändert sich unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes in anisotroper Weise, so daß sich Lichtwellen unterschiedlicher Polarisation mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten können.

Durch geeignete Ausrichtung der Hauptachse des elektrooptischen Materials wird ein Laufzeit- bzw. Gangunterschied zweier orthogonaler Feldkomponenten erzielt, der von der angelegten Spannung abhängt.

Dazu befindet sich der elektrooptische Kristall transversal oder longitudinal zur Richtung der Lichtwellen, je nach der Eignung der elektrooptischen Koeffizienten des Material, zwischen zwei Flächenelektroden wie bei einem Plattenkondensator.

Beträgt die angelegte Spannung $U_{\lambda/2}$, so bedeutet das einen Gangunterschied dieser beiden Feldkomponenten der Lichtquelle von einer halben Wellenlänge.

Bei dieser Modulationsspannung $U_{\lambda/2}$ des Modulationsgenerators 1 hat sich die lineare Polarisierung zwischen Eingang und Ausgang des Polarisationsmodulators 5 bzw. 19 um 90° gedreht. Damit sind die entsprechenden Lichtstrecken der Intensitätsmodulatoren 8 und 22 für das entsprechend polarisierte Licht völlig transparent.

Deren Modulatorkennlinie 40 wird für unterschiedliche Modulationsspannungen entsprechend dem Gesetz von Malus durch einen sinusförmigen Verlauf beschrieben, wie in Fig. 3 über der Modulationsspannung und dem Gangunterschied dargestellt.

Damit hängt die Transmission 42 des Lichts gemäß der dargestellten Modulatorkennlinie 40 von der angelegten Spannung des Modulationssignals 41 ab:

$$T(U) = \sin^2(90^\circ U/U_{\lambda/2}) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(180^\circ U/U_{\lambda/2}).$$

Bei einer nadelimpulsförmigen Modulationsspannung liegt der Ruhearbeitspunkt vorzugsweise im Koordinatensprung von Fig. 3. Für eine sinusförmige Modulation wird als Arbeitspunkt vorzugsweise der Wendepunkt 45 dieser Cosinusquadratkennlinie bei $\pi/2$ - bzw. $\lambda/4$ -Gangunterschied gewählt.

Dazu wird in beiden Intensitätsmodulatoren 8 und 22 eine $\lambda/4$ -Platte 6 bzw. 20 aus doppelbrechendem Material eingefügt, die bezüglich der Polarisationsdrehung die gleiche Wirkung besitzt wie der Polarisationsmodulator bei der Spannung $U_{\lambda/4} = U_{\lambda/2}/2$.

In diesem Fall ergibt eine sinusförmige Modulationsspannung durch das Modulationssignal 43 näherungsweise einen sinusförmig modulierten Verlauf der Transmission 44, der einen Gleichanteil enthält, der zu einer entsprechenden Grundhelligkeit führt.

Fig. 4 und Fig. 5 zeigen zwei Ausführungsbeispiele der Polarisationsmodulatoren 5 bzw. 19. Der Polarisationsmodulator in Fig. 4 ist vom longitudinalen Typ, d. h. Modulationsfeld und Lichtwelle weisen die gleiche Richtung auf. Dazu werden die Flächenelektroden transparent ausgeführt, vorzugsweise als ITO (Indiumzinnoxid)-Dünnschicht.

Da die $\lambda/2$ -Spannung z. B. von einem geeigneten Material KD · P (Kaliumdideuteriumphosphat) mit ca. 4000 Volt relativ hoch ist, werden mehrere Schichten verwendet, an denen über die Zuleitungen 53 und 54 die gleiche Modulationsspannung 52 anliegt.

Bei z. B. 10 Schichten beträgt die $\lambda/2$ -Spannung dieser Anordnung nur noch ein Zehntel. Bei sinusförmiger Modulation reicht damit in der Praxis ein Effektivwert von etwa 60 bis 100 Volt aus.

Der Polarisationsmodulator 5 bzw. 19 in Fig. 5 ist vom transversalen Typ. Dementsprechend wird durch die Modulationsspannungsquelle 61 über die Flächenelektroden 62 und 63 ein elektrisches Feld quer zur Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle angelegt. Hierzu sind Materialien wie Lithiumniobat mit einem elektrooptischen Koeffizienten r_{33} etwa 30 pm/V oder DAST mit r_{11} etwa 300 bis 400 pm/V geeignet.

Durch eine zusätzliche Schichtung analog zu der in Fig. 4 läßt sich die erforderliche Modulationsspannung oder die Länge des Polarisationsmodulators verringern.

Eine solche Ausführung der erfindungsgemäßen 3D-Kamera: weist insbesondere folgende Vorteile auf:

- Verglichen mit einem Spiegelscannersystem ist die 3D-Kamera kompakt, ohne bewegte Teile, benötigt keinen Laser, die relative Bandbreite kann bis zu 10% betragen, erlaubt den Einsatz z. B. eines LED-Arrays und liefert mit ca. 20 Watt ein um den Faktor 1000 höheres Signalrauschverhältnis gegenüber einem Spiegelscannersystem, daß wegen der Augensicherheit einen Laserstrahl von z. B. nur 20 mW Sendeleistung verwendet.

- Der Betrieb der Modulatoren ist nahezu verlustfrei und das Umschalten der Frequenzen durch die Induktivität des Schwingkreises erfolgt synchronisiert im Stromnulldurchgang der Induktivitäten ebenfalls verlustarm.

- Keine Augensicherheitsprobleme und keine Speckle-Probleme, da kein Laser erforderlich ist.

- Durch symmetrische Verteilung des Sendelichts zur Empfangsachse können Spiegelungseffekte verringert werden.

- Durch genaue Vermessung eines großen Modulationsfrequenzbereiches können durch Fouriertransformation Mehrfachreflexionen unterschieden werden.

- Durch gezieltes Drehen der Polarisationsrichtungen des Sende- oder Empfangslichts können polarisationsabhängige Reflexionen unterdrückt werden.

Schließlich liefert die gleiche Anordnung von Bild 2 mit dem Schalter 29 in der strichlierten Schalterstellung die Möglichkeit, durch Modulation mit Nadelimpulsen, vorzugsweise aus dem Nullpunkt der Modulatorkennlinie heraus, durch Variation der gegenseitigen Verzögerung von Sende- und Empfangsmodulationssignal den Raum ähnlich zum bekannten TDR (Time Domain Reflectometry)-Verfahren in der Tiefe schichtweise abzutasten, wobei die Faltung der Nadelimpulskorrelationsfunktion mit der räumlichen Reflexionscharakteristik der 3D-Szene ermittelt wird.

Patentansprüche

1. 3D-Kamera nach dem Laufzeitprinzip unter Verwendung elektromagnetischer Wellen, vorzugsweise von Lichtwellen, mit mindestens einem Sender, der eine Lichtwelle (11 bzw. 12) auf eine 3D-Szene (13), deren Entfernungscharakteristik vom Sender (9) und vom Empfänger (23) in einem gewünschten Raumwinkel gemessen werden soll, sendet, sowie einem Empfänger (23), der die in Richtung des Empfängers reflektierte Lichtwelle (14 bzw. 15) über einen zwischendimensionalen Detektor empfängt und demoduliert, einer vom Sender zum Empfänger führenden Referenzlichtstrecke (32), einem Modulationsgenerator (1), der sowohl

- den Sender (9) als auch zum Zweck der Demodulation den Empfänger (22) elektronisch moduliert, einer Ablaufsteuerung (27) und einer Auswerteeinheit (26), die pixelweise aus den gemessenen Intensitätswerten die Laufzeitbeziehungen und damit die 3D-Koordinaten der 3D-Szene ermittelt und daraus ein dreidimensionales Bild rekonstruiert **dadurch gekennzeichnet**, daß der Sender intensitätsmodulierte Lichtwellen mindestens eines Spektralbereichs, jedoch vorzugsweise von drei, den Farben rot, grün und blau entsprechenden Spektralbereichen aussendet und die von der 3D-Szene (13) in den Empfänger (23) reflektierten Lichtwellen vorzugsweise durch vorgeschaltete Bandfilter (17) spektral getrennt über mindestens einen Intensitätsmodulator (22) wahlweise von mindestens einem spektral zugehörigen 2D-Empfangelement (25), vorzugsweise einem Mehrfarben-CCD-Chip, pixelweise in elektrische Signale umgewandelt werden, aus denen mittels der Auswerteeinheit (26) dreidimensionale Grauwertbilder oder vorzugsweise dreidimensionale Farbbilder rekonstruiert werden und daß dabei die Lichtquelle (2) des Senders (9) zumindest zeitweilig Licht konstanter Intensität aussendet, das durch einen nachgeschalteten optischen Intensitätsmodulator (8) moduliert wird, wobei die empfangenen Lichtwellen durch den dem 2D-Empfangelement (25) vorgeschalteten optischen Intensitätsmodulator (22), der möglichst gleichartig zum sendeseitigen Intensitätsmodulator (8) ausgelegt und betrieben wird, demoduliert werden, und wobei beide Intensitätsmodulatoren (8 und 22) durch das gleiche Modulationssignal oder durch das bis auf einen durch ein steuerbares Verzögerungsglied (28) verursachten Zeitversatz gleiche Modulationssignal wahlweise in Form einer Sinusschwingung im MHz bis GHz-Bereich oder in Form von Nadelimpulsen im ps- bis ns-Bereich angesteuert wird.
2. 3D-Kamera nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Sende-Intensitätsmodulator (8) und der Empfangs-Intensitätsmodulator (22) eingangsseitig linear polarisierte Lichtwellen erhalten und ausgangsseitig je ein Polarisationsfilter (7 bzw. 21) enthalten, dessen Polarisation zu diesen linear polarisierten eingangsseitigen Lichtwellen gekreuzt ist und daß sich jeweils vor dem ausgangsseitig enthaltenen Polarisationsfilter (7) des Sende-Intensitätsmodulators (8) und vor dem ausgangsseitig enthaltenen Polarisationsfilter (21) des Empfangs-Intensitätsmodulators (22) je ein elektrooptisch aktiver Polarisationsmodulator (5 bzw. 19) möglichst gleicher Eigenschaften befindet, der von einem gemeinsamen Modulationsgenerator (1) wahlweise mit dem gleichen oder mit dem — bis auf einen Laufzeitunterschied T einer steuerbaren Verzögerungseinheit — gleichen Modulationssignal angesteuert wird.
3. 3D-Kamera nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Sende-Intensitätsmodulator (8) und der Empfangs-Intensitätsmodulator (22) jeweils vor dem ausgangsseitigen Polarisationsfilter (7 bzw. 21) eine sog. $\lambda/4$ -Platte mit einem Gangunterschied einer viertel Wellenlänge enthält.
4. 3D-Kamera nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Empfänger vor dem Intensitätsmodulator (22) mindestens ein Bandfilter (17) entsprechend dem optischen Spektralbereich des Senders und ein Polarisationsfilter (18) entsprechend der Polarisierung des vom Sender (9) abgegebenen Lichts enthält.
5. 3D-Kamera nach Anspruch 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Polarisationsmodulatoren (5 bzw. 19) möglichst gleichartig aufgebaut sind und vorzugsweise aus mehreren Schichten bestehen, an denen, den elektrooptischen Effekt verstärkend, die gleiche Modulationsspannung mit longitudinalen Modulationsfeldern anliegt.
6. 3D-Kamera nach Anspruch 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Polarisationsmodulatoren (5 bzw. 19) aus mehreren Schichten bestehen, an denen, den elektrooptischen Effekt verstärkend, die gleiche Modulationsspannung mit transversalen Modulationsfeldern anliegt.
7. 3D-Kamera nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtwellen des Senders (9) aus mehreren Spektralbereichen, z. B. drei Farben, bestehen, die mit einem einzigen Intensitätsmodulator (8), der auf den mittleren Spektralbereich hin ausgelegt ist, intensitätsmoduliert werden.
8. 3D-Kamera nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Modulationsgenerator (1) für die gleiche 3D-Szene nacheinander mindestens drei verschiedene Frequenzen etwa für die Dauer von ms bis zu Sekunden erzeugt, in der die Intensitäten pixelweise integriert werden, wobei aus den diesen Frequenzen zugehörigen Intensitätsbildern in der Auswerteeinheit die zugehörigen Laufzeitinformationen berechnet und zusammen mit den Grauwert- bzw. Farbinformationen der Grundhelligkeit am Ausgang (30) als komplette 3D-Grauwertbilder bzw. 3D-Farbbilder zur Verfügung gestellt werden.
9. 3D-Kamera nach Anspruch 1 oder einem der nachfolgenden, gekennzeichnet durch die Verwendung eines einzigen Spektralbereichs mit nur einem sendeseitigen Intensitätsmodulator (8) und nur einem empfangsseitigen Intensitätsmodulator (22) und einem optischen 2D-Empfangelement für die Grauwertdetektion.
10. 3D-Kamera nach Anspruch 1 oder einem der nachfolgenden, dadurch gekennzeichnet, daß die Referenzstrecke (32), die von mindestens einem Spektralbereich der gesendeten Lichtwellen zu mindestens einem zugeordneten empfangenen Spektralbereich des Empfängers führt, durch mehrere Lichtleitfasern unterschiedlicher Laufzeit, deren Referenzlicht auf mehrere Pixel mindestens eines spektral zugeordneten 2D-Empfangelements (25) zum Zweck einer systematischen, räumlichen Kalibrierung abgebildet wird, realisiert wird.
11. 3D-Kamera nach Anspruch 1 oder einem der nachfolgenden, dadurch gekennzeichnet, daß die Ausgangspolarisation des Senders und die Eingangspolarisation des Empfängers wahlweise gleich und entweder horizontal oder vertikal ist oder gekreuzt ist.
12. 3D-Kamera nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß für die gleiche 3D-Szene jeweils mindestens 2 eigenständige 3D-Messungen durch jeweils mindestens drei Frequenzen durchgeführt werden, wobei sich diese 2 oder mehrere Frequenzkombinationen vorzugsweise um einen konstanten Frequenzversatz unterscheiden.
13. 3D-Kamera nach Anspruch 1 oder einem der nachfolgenden, dadurch gekennzeichnet, daß von der

gleichen 3D-Szene mindestens 3 verschiedene Intensitätsbilder auf dem 2D-Empfangelement (25) nacheinander bei mindestens drei verschiedenen durch die Verzögerungseinheit (28) eingestellten Phasenlaufzeitunterschiede zwischen dem Sender- und dem Empfänger-Modulationssignal aufgenommen und daraus pixelweise die Entfernungsinformationen und das zugehörige 3D-Bild berechnet werden.

14. 3D-Kamera nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Phasenlaufzeitunterschiede der Verzögerungseinheit (28) durch zwischengeschaltete Leitungsstücke realisiert werden.

15. 3D-Kamera nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß für die gleiche 3D-Szene mindestens 2 eigenständige 3D-Messungen durch mindestens drei verschiedene durch die Verzögerungseinheit (28) eingestellten Phasenlaufzeitverzögerungen τ durchgeführt werden, wobei diese 2 oder mehrere Phasenlaufzeitkombinationen jeweils unterschiedlichen Frequenzen des Modulationssignals zugeordnet werden.

16. 3D-Kamera nach Anspruch 2 oder einem der nachfolgenden, dadurch gekennzeichnet, daß die Kapazitäten der beiden Polarisationsmodulatoren (5 und 19) zusammen mit der Verzögerungseinheit (28) und dem Modulationsgenerator (1) bei der jeweils eingestellten Frequenz eine nahezu verlustfreie Resonanzschaltung mit einer frequenzbestimmenden Schwingkreisinduktivität darstellen.

17. 3D-Kamera nach Anspruch 1, 8 und 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Umschaltung der Modulationsfrequenz durch die Umschaltung der frequenzbestimmenden Schwingkreisinduktivität synchronisiert im Stromnulldurchgang der Schwingkreisinduktivität vorzugsweise unter Berücksichtigung von Leitungsabschnitten der Laufzeit τ der Verzögerungseinheit (28) und deren Transformationseigenschaften erfolgt.

18. 3D-Kamera nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Material der beiden Polarisationsmodulatoren (5 und 19) doppelbrechend ist und in der Länge so ausgelegt wird, daß der Gangunterschied ohne angelegte Spannung eine viertel Wellenlänge beträgt und damit die $\lambda/4$ -Platten (6 bzw. 20) entfallen können.

19. 3D-Kamera nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Polarisationsmodulatoren so unter dem Brewsterwinkel angeordnet werden, daß das 1. Polarisationsfilter (4) und das 3. Polarisationsfilter (18) entfallen können.

20. 3D-Kamera nach Anspruch 1 oder einem der nachfolgenden, dadurch gekennzeichnet, daß im Sender (9) und im Empfänger (23) vorzugsweise die gleichen Optiken verwendet werden und daß die Lichtquelle (2) jeweils durch ein Leuchtdiodenarray etwa der Größe der aktiven Fläche des 2D-Empfangelementes (25) gebildet wird.

21. 3D-Kamera nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Modulationsgenerator (1) in der strichlierten Stellung des Schalters (29) Nadelimpulse abgibt und die 3D-Szene (13) durch Wahl der Verzögerungszeit τ der Verzögerungseinheit (28) räumlich in der Tiefe schichtweise vermessen wird, wobei vorzugsweise im Sende- und Empfangs-Intensitätsmodulator (8 und 22) keine $\lambda/4$ -Platte verwendet wird.

22. 3D-Kamera nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtquelle (2) vorzugsweise als mindestens ein gepulstes Leuchtdiodenarray realisiert und von der Ablaufsteuerung über die strichlierte Verbindung (37) so getriggert wird, daß der Nadelimpuls etwa in das Maximum des von der Lichtquelle (2) abgegebenen Impulses fällt.

23. 3D-Kamera nach Anspruch 1 oder einem der nachfolgenden, dadurch gekennzeichnet, daß für eine 3D-Farbaufnahme sendeseitig nur eine Lichtquelle (2), die Weißlicht abgibt, sowie vorzugsweise nur ein Intensitätsmodulator (8) verwendet wird.

24. 3D-Kamera nach Anspruch 1 oder einem der nachfolgenden, dadurch gekennzeichnet, daß in einer vereinfachten Ausführung die 3D-Szene nur mit einer modulierten Lichtzeile beleuchtet wird, die empfangsseitig über einen entsprechend zugeordneten Empfangs-Intensitätsmodulator auf ein eindimensionales Empfangselement, vorzugsweise in Form einer CCD-Zeile, abgebildet wird, wobei die dritte Dimension durch Scannen oder die Bewegung der 3D-Szene ermittelt wird.

25. 3D-Kamera nach Anspruch 1 oder einem der nachfolgenden, dadurch gekennzeichnet, daß die Ablaufsteuerung (27) in der strichlierten Stellung des Schalters (29) einerseits über die gesteuerten Phaseinheit (28) eine binäre Phasenumtastung, daß heißt Phasenänderungen von 0° und 180° zusätzlich zu einer Grundphasenverschiebung für das Sende-Modulationssignal nach vorzugsweise einem pseudobinären Zufallscode bewirkt, während das Empfangs-Modulationssignal unbeeinflusst bleibt, und andererseits die Auswerteeinheit (26) und/oder das 2D-Empfangelement (25) synchron so steuert, daß die Intensitätsamplituden pixelweise entsprechend diesem Pseudozufallscode positiv bzw. negativ gewichtet und über mehrere Perioden dieses Codes aufintegriert werden.

26. 3D-Kamera nach Anspruch 1 oder einem der nachfolgenden, dadurch gekennzeichnet, daß die Ablaufsteuerung nach Kriterien der Güte der 3D-Meßergebnisse der Auswerteeinheit über die Verbindung (36) im Sinne einer Verbesserung des Meßergebnisses durch entsprechende optimierte Anpassung beeinflusst wird.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

Fig. 1

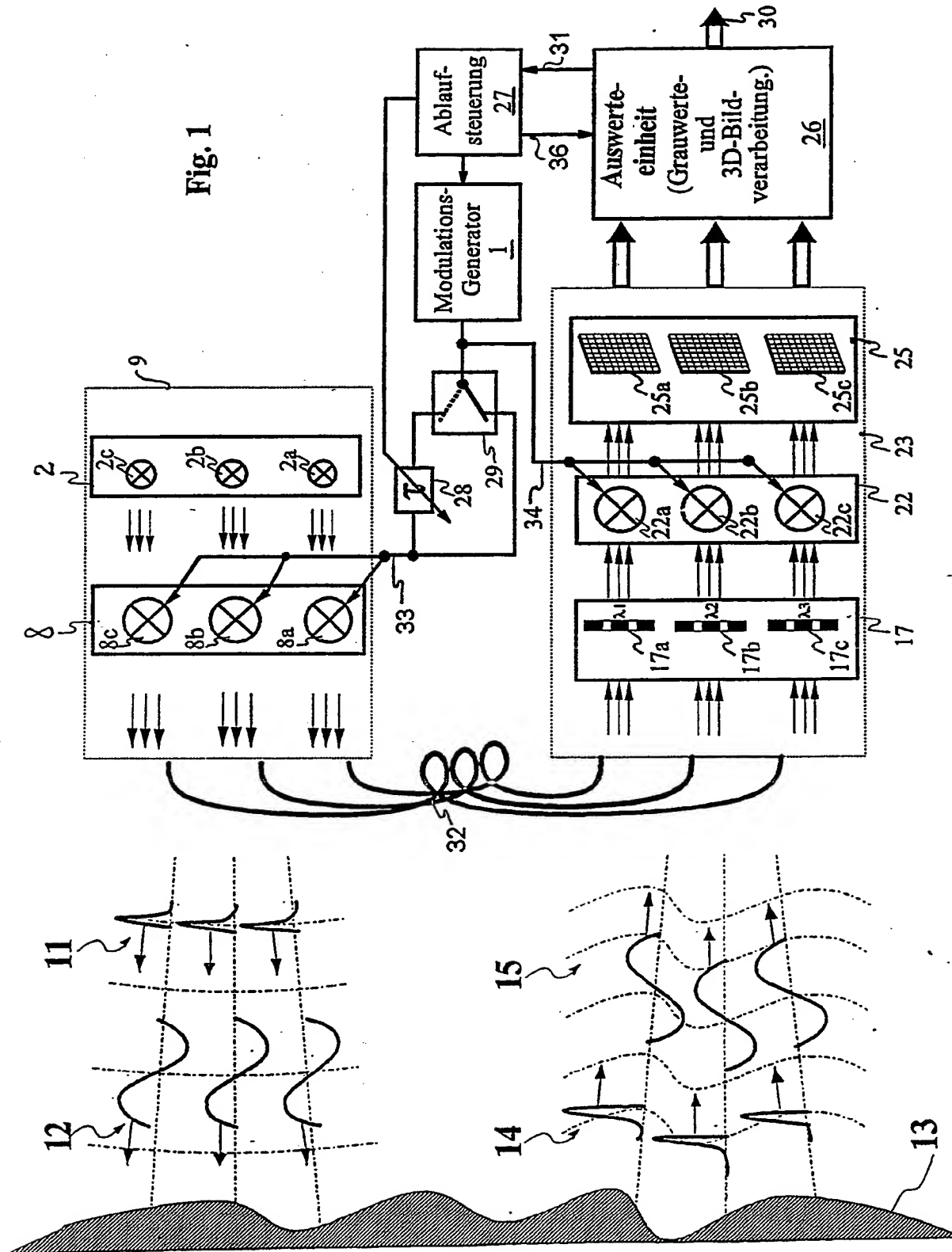
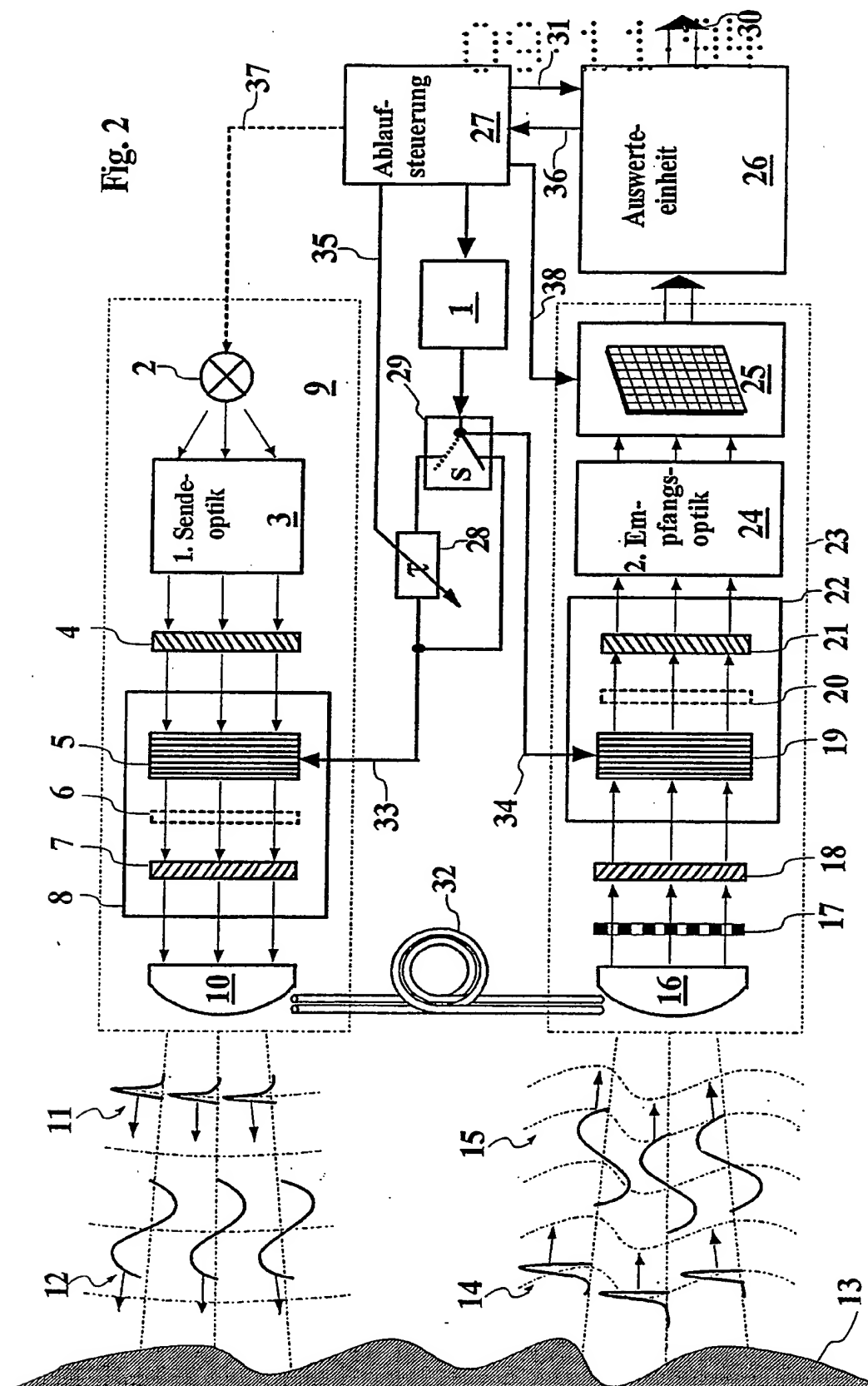


Fig. 2



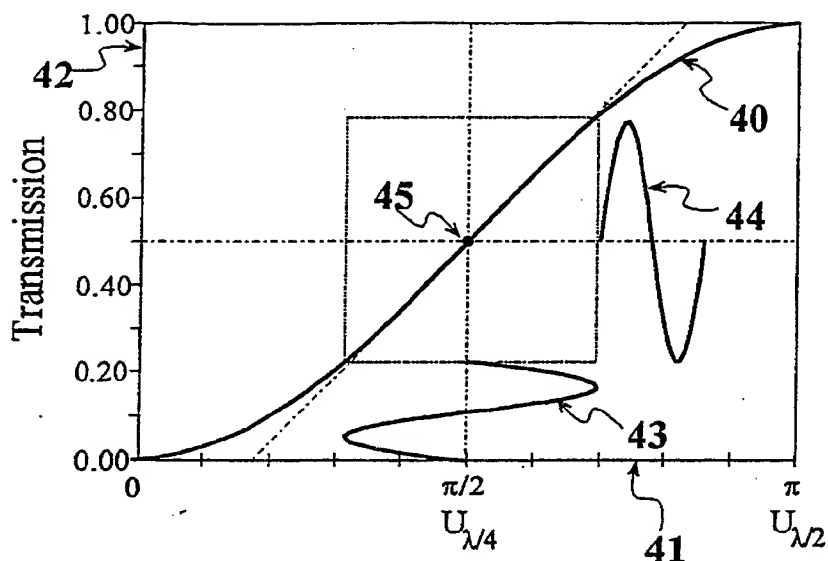


Fig. 3

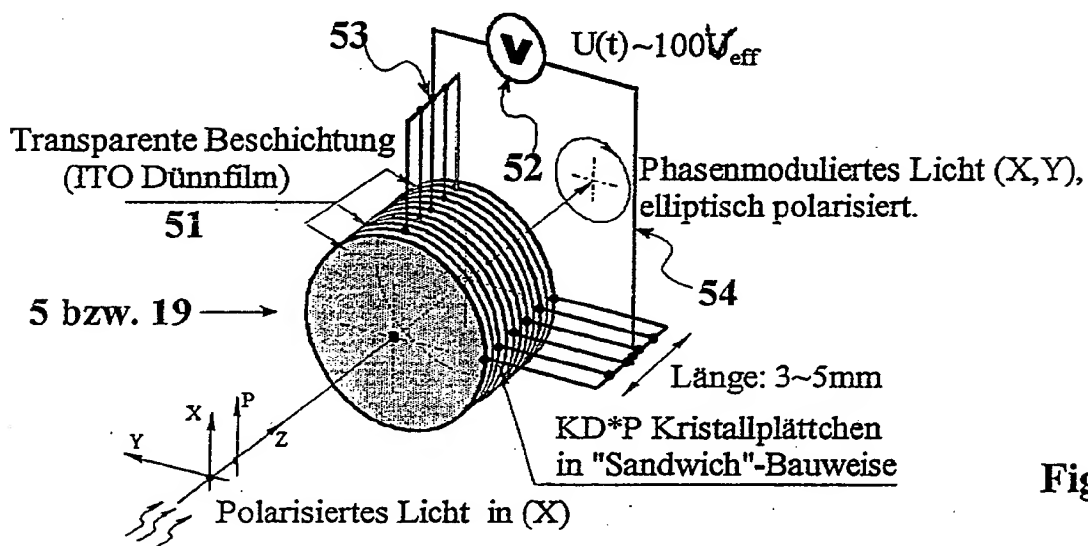


Fig. 4

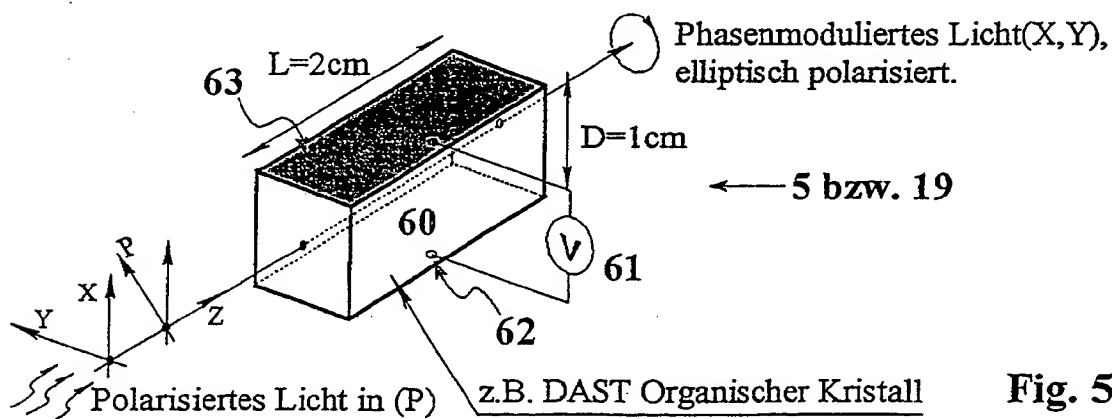


Fig. 5